

# 煤与瓦斯突出的二维模拟实验研究\*

孟祥跃 丁雁生 陈力 白蓉裳 谈庆明

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 介绍了自行设计、加工的模拟煤与瓦斯突出的二维实验装置及配套的压力数据自动采集处理系统。在二维模拟实验装置上做了一系列的实验。实验发现,煤样的破坏存在“开裂”和“突出”两类典型的破坏形式,破坏阵面的前沿以拉伸强间断的形式向外传播。煤体破坏的初期是轴对称的,而后则只在某一方向上向外扩展,而且破坏阵面的扩展速度是逐渐衰减的,不存在恒稳推进。在煤体破坏过程中,应力重新分布,并有 4 种不同的应力转移形式。这些结论对于认识煤与瓦斯突出的机理是十分有益的。

**关键词** 煤与瓦斯突出 二维模拟实验 地应力 瓦斯压力

地应力、瓦斯压力和煤的力学性质在煤与瓦斯突出中起着主导作用。但是人们对地应力和瓦斯压力这两个主要因素综合作用的机理还不甚清楚。50 年代起,前苏联学者 Кравченко В. С. (1956 年) 和日本的一些学者<sup>[1,2]</sup>在实验室模拟了煤与瓦斯突出。在一维模拟实验研究中,我们已经做了大量的工作,而且得到了许多有意义的结果<sup>[3,4]</sup>,但它只能研究瓦斯压力这一个因素对突出的作用,无法考察地应力的影响。因此我们设计了既可以改变地应力,又可以改变瓦斯压力的二维模拟实验装置。

## 1 实验装置与实验技术

### 1.1 实验装置

二维模拟实验装置如图 1 所示。该装置主要由缸体、上盖板、活塞及油压千斤顶组成。上盖板与缸体周边用螺栓紧固在一起;油压千斤顶通过传力环对活塞加力,活塞的向上运动即可将放在它上面的煤

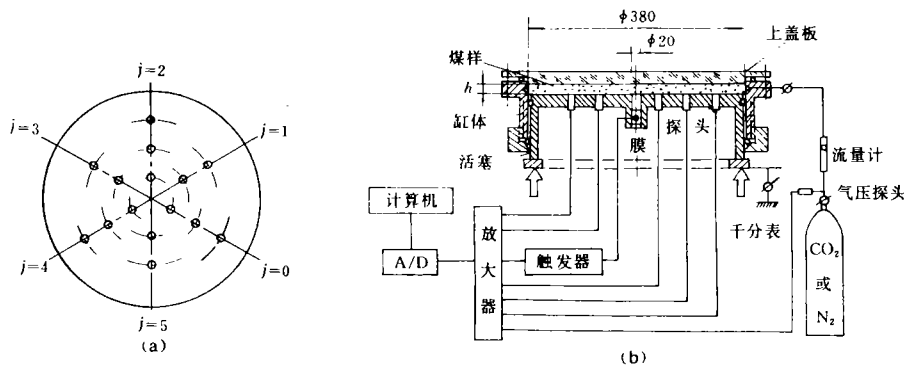


图 1 实验装置与测量系统

Fig. 1 Experimental set-up and measuring system

收稿日期:1995-05-08  
\* 国家自然科学基金资助项目

粉压制各种密度的煤饼(直径 380mm,厚度在一定范围内可调). 为煤与瓦斯突出留设的中心孔直径有 3 种,分别为 10,20 和 30mm. 测压传感器在压煤活塞上的布置如图 1(a)所示,15 只传感器有规律地分布在活塞平面的径向与环向的各交点上. 定义测量孔的径向坐标为  $R$ ,mm, $R=25(i+1)$ ,其中  $i=1\sim 5$ ; 环向坐标为  $\theta$ , $(^\circ)$ , $\theta=60j$ ,其中  $j=0\sim 5$ ,则测量孔的位置可以用  $i$  和  $j$  的值来表示. 例如  $i=1$ , $j=2$  代表  $R=50$ mm, $\theta=120^\circ$  的测量孔. 实验中的突然卸载是通过引爆喷煤孔处的点火头和枪药,使铝膜突然破坏而实现的.

## 1.2 实验技术

在实验技术方面主要解决以下 3 个问题.

(1) 采样与破膜的同步技术 实验中为了使计算机能够记录到发生瓦斯突出时测压传感器的压力信号变化,必须保证计算机采样与火药破膜同步,图 2 为同步系统示意图.  $K$  是双刀单掷开关,实验前先将电容器  $C$  充电,一切准备就绪后,合上双刀开关  $K$ ,即可实现计算机采样与破膜的同步.

(2) 压力测试技术 压力测量系统见图 1(b). 传感器受压产生的电信号,经过两级 16 通道直流放大器组放大,然后用 16 通道 A/D 变换器把放大的电信号由模拟量转变为数字量并储存在计算机里. 实验中的压力测量误差控制在满量程的 2% 以内.

(3) 煤样制作技术及煤的物性参数 煤样的均匀性受到诸多因素的影响,制作带有一定的随机性. 实验煤粉粒度为 0.1~0.2mm,并均匀地加入相当于干煤粉质量 8.1% 的水. 实验中对于制作出的较厚的煤样(30mm 左右),其均匀性比较好,此时煤样内各测点压力的均方根误差在 5% 左右;但对于较薄的煤样(20mm 左右),各测点压力的均方根误差一般在 10% 左右.

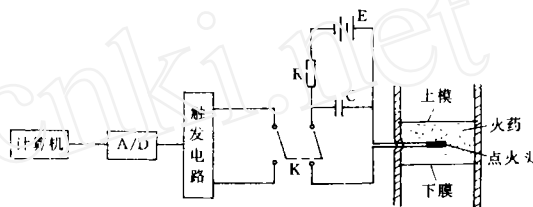


图 2 同步系统

Fig. 2 synchro-system

## 2 实验结果的分析与讨论

在二维实验装置上,利用测压系统,进行了一系列煤与瓦斯突出的二维模拟实验,实验参数及结果如表 1 所示.

表 1 中的  $p$  代表传感器测量到的总压力; $p_g$  为充气压力,即孔隙压力. 总压力  $p$  是地应力与孔隙压力综合作用的结果,它与孔隙压力  $p_g$  之间的关系为  $p=(1-\epsilon)p_s+\epsilon p_g$ ,其中  $p_s$  为固相压力; $\epsilon$  为煤样孔隙率.

表 1 实验参数与实验结果

Table 1 Test parameters and data

$p$ /MPa	$p_g$ /MPa										
	0.15	0.18	0.20	0.22	0.23	0.24	0.27	0.31	0.39	0.41	0.50
0.5			中,B		薄,B			中,B			
1.0	中,CN	厚,CN	中,C	薄,CN	厚,B;中,B	中,B;中,B	中,B*	中,B	中,B	中,B*	中,B*
1.2			中,CN								
1.3			厚,N								

注:喷煤孔径为 20mm,但注“\*”号者为 30mm;煤样质量为 1.5~1.8,2.5,3.5kg,分别对应薄、中、厚煤层;结果类型:B——突出;C——开裂;CN——有肉眼不可见裂纹;N——无裂纹.

在二维模拟实验中,我们是根据布置在煤样表面的测压传感器的压力信号在实验过程中的变化规律,来判定煤样的各个不同位置的破坏形态的<sup>[5]</sup>.图 3 为反映瓦斯突出实验过程中各测点总压力  $p$  随时间的变化曲线.

在图 3 中,传感器压力急剧下降到接近于零的曲线,表示该测点处的煤样发生了拉伸破坏,并完全失去承载能力;压力有所下降的曲线,表示该测点处的煤样出现了剪切破坏,但还有一定的承载能力;而压力不变或有所上升的曲线,则表示该测点处的煤样未出现任何破坏.

根据对实验数据进行的处理和分析,可以把实验现象和处理结果描述如下.

(1)实验证实,煤样的破坏和一维情况相同,也存在“开裂”和“突出”两类现象.

(2)煤样破坏之后,各测压点的总压力  $p$  随着时间的推移,有 4 种不同的变化趋势,如图 4 所示.

在图 4(a)中,曲线 1 代表的压力是先有所上升,然后又急剧下降;曲线 2 中的压力也是先上升,经过一段时间后又开始缓慢下降;曲线 3 中的压力一直在缓慢上升,直到破坏终止后变为一条水平线;另外,还有第 4 种变化形式的曲线,在压力急降之前未见上升,如图 4(b)所示.

压力升高是压力转移现象所致.煤样只出现开裂时,压力的升幅约在 10% 以下;发生突出时,压力一般上升 10%~40%,但有的测压点升幅可达 50% 以上.

实验表明,总压力变化的时间为几十至上百毫秒量级.由于施加压力的装置质量很大,在这么短的时间内轴向总力  $F$  来不及变化.当喷煤孔附近的煤样发生破坏时,其承载能力完全丧失或有所下降,原来承担的轴向载荷必然要转移到外侧未破坏区域的煤体上,也就是出现了压力转移现象.图 5 即为图 4(a)对应的压力转移值  $\Delta p$  与时间  $t$  的关系曲线.

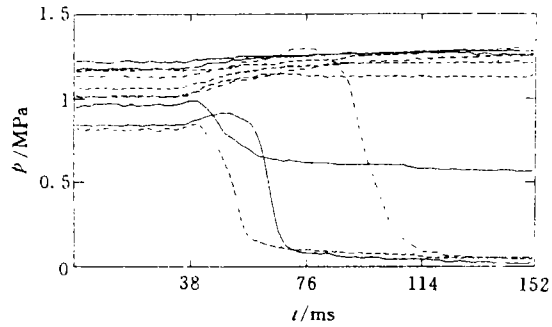


图 3 各测点压力随时间的变化

Fig. 3 Pressure profiles as a function of time at various stations

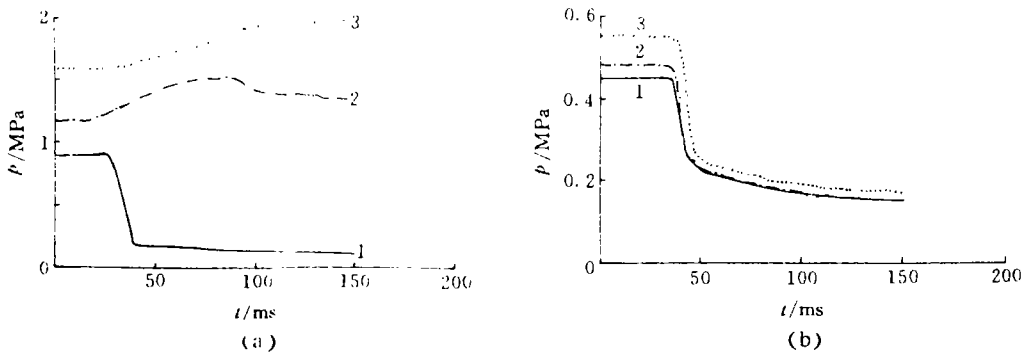


图 4 压力随时间变化的 4 种典型曲线

Fig. 4 Four typical pressure profiles as a function of time

(a)1106a;  $\theta=120^\circ$ , 1~3 —  $i=1, 3, 5$ ; (b)1112a;  $R=50\text{mm}$ , 1~3 —  $j=0, 2, 4$

图 4(a)中曲线 1 的压力急剧下降,是由于煤样发生开裂或突出时,很快失去承载能力所致.这与瓦斯突出的一维模拟实验中的拉伸破坏现象是一致的.但是二维模拟实验比一维情况要复杂得多.

第一,据现有二维实验数据估计,煤体破坏时,轴向总压力的下降速度约为 10MPa/s,但是压降的快

慢波动很大,有时甚至出现短时间的平台,即煤样出现了延期破坏,如图6所示.而在一维实验中,煤样的破坏是比较稳定和规律的.

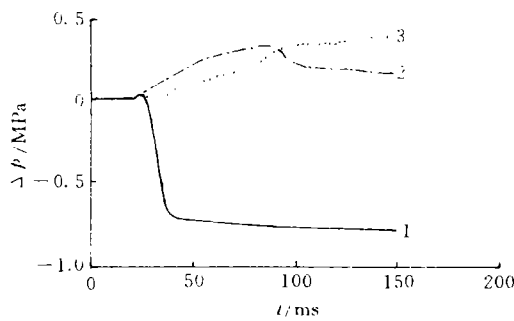


图5 压力转移值与时间的关系

Fig. 5 Pressure shift vs time

1106a,  $\theta=120^\circ$ , 1~3 —  $i=1, 3, 5$

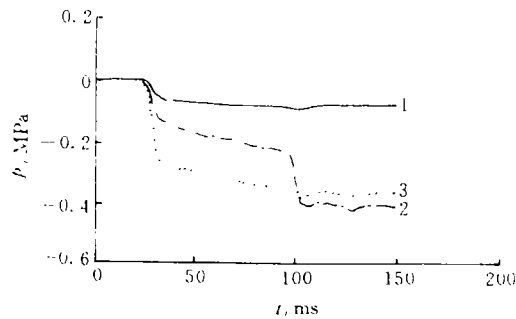


图6 反映延期开裂的压力-时间曲线

Fig. 6 Pressure vs time curve reflecting delayed fracture

1111a,  $P=50$  mm, 1~3 —  $j=0, 2, 4$

第二,在一维与二维模拟实验中,煤体的破坏阵面都是以拉伸强间断的形式向外传播的.在二维实验中,破坏阵面的推进速度  $w$  为  $1$  m/s 量级,如图7所示,比一维实验中的  $w$  ( $10$  m/s 量级)要小得多.其中一维实验煤样的抗拉强度为  $0.005$  MPa,二维实验煤样的抗拉强度为  $0.01$  MPa.即使煤样强度条件相同,二维实验中煤样破坏阵面的推进速度也要低于一维实验中的推进速度.这是由于二维实验中破坏煤体的运动为径向收缩运动,作用于径向运动着的破坏煤体上的阻力随着半径的减小而增加.另外,二维实验中破坏阵面的传播速度波动较大,即使在同一次实验中,不同半径方向上的速度  $w$  也相差很大.例如,在实验1106a中,在  $\theta=60^\circ$  的方向上,  $w=5$  m/s.

第三,在一维模拟实验中,当孔隙压力大于某一临界值后,破坏阵面的推进是恒稳的;而在二维模拟实验中,破坏阵面的推进是衰减的,不存在恒稳.

图4(a)中曲线2,压力开始时上升,而后又缓慢下降,这主要出现在拉伸破坏面外侧较近的区域.由于压力转移,当压力升高到一定值后就会使煤体发生剪切破坏;剪切破坏的煤体仍有一定的承载能力,因此使压力缓慢下降.在此压降的过程中,由于时间相对较短(几十至上百毫秒),而孔隙压力又显著小于骨架应力,因此由渗流所造成的孔隙压力下降对总压力的影响可以忽略不计.实验后观察到煤样剪切破坏的痕迹.破坏面的形状与两侧壁面的摩擦因数有关,呈圆弧鳞片状.

图4(a)中曲线3,其压力缓慢增加直至破坏终止也不下降,这主要发生在离突出孔较远的区域,尽管此处煤体所承受的轴向压力很大,但离破坏面较远,因此该处的煤样不会发生任何破坏;随着破坏面积的扩大,压力转移使此处煤体承受的压力逐渐增加,直到破坏终止.图4(b)所示的第4种压力-时间曲线,发生在离突出孔很近的地方.在中心孔突然卸载时,此处的煤样立即破坏,其上原来所承受的压力立刻转移到破坏阵面外侧的煤体上,而它自身的压力则只有陡降而无上升.

(3)若把破膜前的轴向总压力分布称为煤体的原始应力场  $p_0$ ,把破膜后的轴向总压力  $p$  与破膜前总压力之差  $\Delta p$  称为附加应力场,则可以看到附加应力场随着煤体的破坏其空间分布随着时间的推移呈现明显的规律性.

图8为不同时刻同一圆周上各测量点处  $\Delta p$  平均值的连线,相邻两条连线之间的时间间隔为  $3.8$  ms.由图8可以看出,附加应力场是由煤样破坏后的应力转移造成的,即应力场进行了重新分布,这与采矿科学中采动应力场相类似,只是在瓦斯突出过程中应力场的变化是一个十分快的过程,而采动应力场的变化则是一个相对比较慢的过程.图8中各个时刻  $\Delta p$  连线的变化即反映了突出过程中附加应力场的空间分

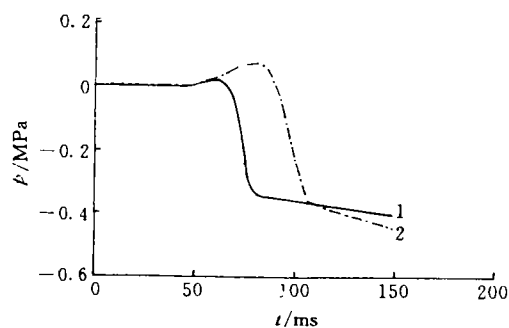


图7 反映推进速度的压力-时间曲线

Fig. 7 Pressure vs time curve representing propagation velocity  
1129a;  $\theta=300^\circ$ , 1, 2 —  $i=2, 4$

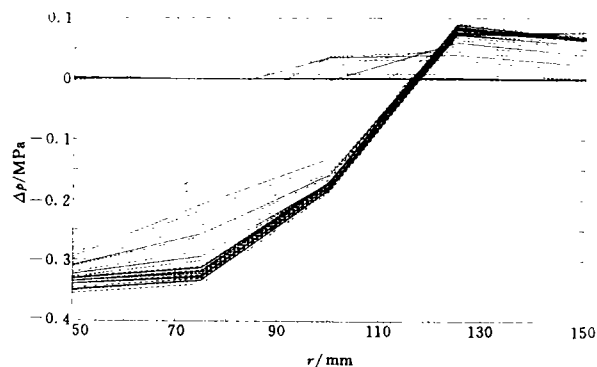


图8 1112a号实验在不同时刻应力场空间分布的演化

Fig. 8 Evolution of spatial distribution of stress field of No. 1112a test at different time

布是怎样演变的。

(4)实验发现,煤样开裂和突出的发展,就其全过程而言并不是轴对称的,但在喷煤孔附近煤样破坏的初期,即破膜后的几十毫秒范围内,其扩展是轴对称的。破坏对称发展到一定程度后,则只有某一角区方向上继续扩展。这是由于在煤样破坏的初期,孔隙气压足以使突出孔周围各个方向的煤样发生拉伸破坏并对称向外扩展。但是随着破坏区域的增大,应力转移使未破坏区域煤体上的轴向压力增大,从而使煤体的破坏强度随之增加。由于压制出的煤样不可能绝对均匀,因此,这时破坏只有在煤样的某一最薄弱的角区方向上得以扩展。实验还发现,在发生突出的条件下,煤样破坏区域的最终形状是随机的,不是轴对称的。

### 3 结 论

(1)设计加工的实验装置可以很好地实现煤与瓦斯突出的二维模拟实验,它具有以下特点:①可以独立地施加地压和孔隙压;②压力数据自动采集系统能测出毫秒级的动态应力空间分布;③便于实验。

(2)二维轴对称中心孔突然卸载实验中,煤样的破坏和一维情况相同,也存在“开裂”和“突出”两类典型现象。煤体破坏区前沿压力突降,以拉伸强间断的形式从中心孔向外传播。

(3)在煤体破坏的动态过程中,出现应力转移现象,并观察到有4种不同的形式。

(4)破坏煤体的运动为径向收缩运动,因此,破坏阵面的传播速度与一维情况相比要小得多,而且在现有实验条件下,破坏阵面的向外扩展是逐渐衰减的,不存在恒稳。

(5)煤体破坏初期是轴对称的,而后则只在某一角区方向上扩展。

### 参 考 文 献

- 1 栗原一雄. ガス突出の発生機構の解明に関する基礎的研究. 炭矿技术, 1980(1): 16~19
- 2 氏平増之. 内部ガス圧による多孔質材料の破壊づろやすについて-ガス突出に関する研究. 日本矿业会志, 1984, 100: 397~403
- 3 俞善炳. 恒稳推进的煤与瓦斯突出. 力学学报, 1988, 20(2): 97~106
- 4 郑哲敏, 陈力, 丁雁生. 一维瓦斯突出破坏阵面的恒稳推进. 中国科学(A 辑), 1993, 23(4): 377~384
- 5 丁晓良, 俞善炳, 丁雁生等. 煤在瓦斯一维渗流作用下的初次破坏. 中国科学(A 辑), 1989(6): 600~607

## 作者简介

孟祥跃,男,32岁,助理研究员.1985年毕业于中国矿业大学,1988年获得硕士学位.现从事煤与瓦斯突出的研究工作.1992年在岩石爆破破碎机理项目的研究中,获国家教委科技进步二等奖,发表论文多篇.中国科学院力学研究所,邮政编码:100080.

丁雁生,男,54岁,副研究员.1964年毕业于中国科技大学力学系爆炸力学专业,同年在北京工业学院攻读爆炸物理专业研究生.现从事煤与瓦斯突出机理的研究工作.参加破甲机理研究,获兵器部科技进步二等奖;参加防雷鞋研制,获1990年国家发明三等奖;参加热塑失稳带研究,获1992年国家自然科学二等奖;发表论文多篇.中国科学院力学研究所,邮政编码:100080.

## 2D SIMULATION TEST OF COAL AND GAS OUTBURST

Meng Xiangyue Ding Yansheng Chen Li Bai Rongshang Tan Qingming

(Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences)

**Abstract** 2D(two-dimensional) set up for simulation of coal and gas outburst and an automatic data acquisition and processing system are described. A series of simulation tests are made. It is found that there are two types of coal failures, namely, the fracture type and outburst type. The fracturing front propagates outward in the form of strong tensile interruption, and coal failure is axially symmetrical in the initial period. It then propagates outward only in one direction. The propagation velocity of fracturing front drops gradually, and constant propagation does not exist. In addition, it is also found that stress field redistributes in the process of coal failure, and that there are four forms of stress shift. These findings are beneficial to recognition of the mechanism of coal and gas outburst.

**Keywords** coal and gas outburst, 2D simulation test, tectonic stress, gas pressure

## 会议简讯 4 则

○第5次全国采矿学术会议拟于1996年10月在四川省成都市召开.会议的主题是“矿山发展与环境”.这次学术会议由硅酸盐学会主办,中国煤炭学会参办.

○以煤层气形成及赋存理论、资源预测及评价、中国煤层气地质特征、煤层气勘探开发技术为主要内容的煤层气学术研讨会于1996年第4季度在无锡市召开.

○中国煤炭学会第4届青年学术会议于1996年7月在辽宁省阜新市阜新矿业学院召开,会议的主要内容为“九五”煤炭科技发展.

○“深部开采的岩石力学问题及工程对策”研讨会于1996年第3季度在北京召开,会议的主要内容为“深部矿井施工中的岩石力学问题与解决对策及面向21世纪的岩石力学”.